

УДК 621.3:658.345(075.32)

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕР ЗАЩИТЫ ОТ ПОРАЖЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ НА ЖИВОТНОВОДЧЕСКИХ ФЕРМАХ

А. И. ФЕДОРЧУК, к. т. н., профессор, Е. В. МЕЛЬНИК (УО БГАТУ)

В последние годы в хозяйствах республики отмечались случаи массового электропоражения крупного рогатого скота, например, в Жлобинском, Лельчицком, Березинском и других районах.

В этой связи рассмотрим эффективность применяемых мер защиты от поражения электрическим током. Одной из основных, к тому же самой простой и дешевой, является зануление электрооборудования ферм.

Для зануления в первую очередь используют PEN-проводники. К ним с помощью PE-проводников подключают открытые проводящие части (система TN-C-S). Если они попадают под фазное напряжение (U_ϕ), то происходит однофазное короткое замыкание (к.з.). В этом случае должна сработать соответствующая защита (автоматический выключатель или предохранитель) и за короткое время (менее 0,2 с. для исключения возможной фибрилляции сердца) отключить поврежденный участок цепи. Здесь могут возникнуть ситуации, связанные с различной степенью опасности для персонала ферм и животных.

При занулении ток однофазного короткого замыкания

$I_{к.з.}^1$ при определенных параметрах системы должен быть достаточным для надежного и быстрого срабатывания защиты данной установки. Условие эффективности зануления можно записать так:

$$I_{к.з.}^1 \geq K \cdot I_y, \quad (1)$$

где I_y – ток уставки защитного аппарата;

K – коэффициент кратности тока (чувствительность защиты), благодаря чему обеспечивается надежное и быстрое отключение установки. Значение коэффициента K принимается в зависимости от типа защиты электроустановки и условий эксплуатации. Так, если защита осуществляется плавким предохранителем, время перегорания вставки которого зависит, как известно, от величины тока, или автоматическим выключателем с тепловым или комбинированным расцепителем, то $K \geq 3$ (во взрывоопасных помещениях $K \geq 4$). Если же защита осуществляется автоматическим выключателем с независимой время-токовой характеристикой (отсечкой), то $K \geq 1,25 \dots 1,4$ [1,2,7].

Ток уставки I_y определяется исходя из нагрузки электроустановки или пускового тока электродвигателя.

Ток однофазного к.з. при пробое фазы на зануленный корпус $I_{к.з.}^1$ зависит в данной ситуации от U_ϕ и от полных сопротивлений цепи: силового трансформатора $Z_{тр}/3$; фазного и нулевого проводов Z_ϕ и Z_n , внешнего индуктивного сопротивления петли фаза-нуль X_n , а также от эквивалента активных сопротивлений заземления нейтрали трансформатора r_0 , повторных заземлений нулевого провода r_n и защитного заземления установки r_3 (при его наличии). Так как r_n , r_3 и r_0 велики, как правило, по сравнению с другими сопротивлениями цепи, их во внимание можно не принимать. Тогда

$$I_{к.з.}^1 = \frac{U_\phi}{\frac{Z_{тр}}{3} + Z_\phi + jX_n + Z_n} \quad (2)$$

Комплекс полного сопротивления

$$Z_{\phi 0} = Z_\phi + Z_n + jX_n, \quad (3)$$

в этом случае:

$$I_{к.з.}^1 = \frac{U_\phi}{\frac{Z_{тр}}{3} + Z_{\phi 0}} \quad (4)$$

Формулу (3) можно записать

$$Z_{\phi 0} = \sqrt{(R_\phi + R_n)^2 + (X_\phi + X_n + X_n)^2} \quad (5)$$

где: R_ϕ и R_n – активные сопротивления соответственно фазного и нулевого проводов до зануленной электроустановки (точки к.з.); X_ϕ и X_n – внутренние индуктивные сопротивления соответственно фазного и нулевого проводов; X_n – внешнее индуктивное сопротивление петли фаза-нуль.

Значения R_ϕ и R_n можно определить по известной формуле:

$$R = l * \frac{\rho}{S} \quad (6)$$

где l – длина линии, км; ρ – удельное сопротивление проводника линии: для алюминия 28 Ом.мм²/км, меди – 18; S – сечение проводника, мм².

Удельные внутренние индуктивные сопротивления x_ϕ и x_n для проводников из цветных металлов сравнительно малы (около 0,015 Ом/км), и ими можно пренебречь.

Удельное значение x_n можно определить с приемлемой погрешностью по упрощенной формуле:

$$x_n = 0,1256 \ln \frac{2D}{d} \quad (7)$$

где D – расстояние между проводами, мм; d – диаметр проводника, мм.

Так как расстояние между проводами D для разных линий по существу стандартизировано, а изменение диаметра незначительно, можно принять для воздушной линии $x_n = 0,6$ Ом/км, кабельной в трубах $x_n = 0,15$ Ом/км. [8].

Учитывая изложенное, формулу 5 можно записать так:

$$Z_{\phi 0} = \sum_1^n l \sqrt{(r_{\phi} + r_n)^2 + x_n^2} \quad (8)$$

где n – количество участков линий длиной l (км) из проводов определенного сечения; r_{ϕ} и r_n – активное удельное сопротивление фазного и нулевого проводников, Ом/км; x_n – удельное внешнее индуктивное сопротивление петли, Ом/км.

Сопротивление фазы трансформатора $\frac{Z_{mp}}{3}$ в формуле 4 можно определить по справочным данным, а также по упрощенной формуле:

$$\frac{Z_{mp}}{3} = \frac{C}{P_n} \quad (9)$$

где C – опытный коэффициент, зависящий от величины первичного напряжения трансформатора и схемы соединения его обмоток. Для наиболее распространенных в РБ силовых трансформаторов с $U_{н1} = 10$ кВ, со схемой $Y/YC=26$. [8]; P_n – номинальная мощность трансформатора, кВА.

Вычисленные таким образом значения подставляются в формулу 4, далее анализируется неравенство 1. Если это неравенство соблюдается, то зануление будет эффективным, если же нет, то необходимо принять ряд мер, направленных на увеличение тока $I_{кз}$ или на уменьшение произведения $K * I_{кз}$. Это может быть, напри-

мер, в первом случае увеличение сечения нулевого защитного проводника или замена предохранителей на автоматические выключатели с электромагнитным расцепителем – во втором и т. д.

Таким образом, при однофазном коротком замыкании на корпус (на открытые проводящие части) исправное зануление обеспечит на ферме защиту персонала и животных от поражения электрическим током.

Однако могут возникнуть и другие аварийные режимы. В частности, при обрыве нулевого защитного провода, обрыве и замыкании на землю фазного провода воздушной линии 0,38 кВ, замыкании на землю на стороне 10 кВ на питающей подстанции или на воздушной линии 10 кВ и т. д. В этих случаях наиболее эффективным будет выполнение на животноводческих фермах в дополнение к занулению устройств выравнивания электрических потенциалов (УВЭП) совместно с системой уравнивания потенциалов [3,4]. Под этим процессом понимают снижение относительной разности электрических потенциалов между заземляющим устройством, открытыми проводящими частями и поверхностью земли (или другого электропроводящего основания) в нормальном и аварийном режимах работы, что достигается соединением открытых проводящих частей с уложенными в землю заземлителями (электродами).

На фермах и комплексах крупного рогатого скота, в конюшнях и на биофабриках защиту животных путем выравнивания электрических потенциалов необходимо предусматривать [3,4]:

- в помещениях привязного содержания животных независимо от применяемого технологического оборудования, строительных материалов и конструкций;

- в помещениях для коров и лошадей при содержании их в индивидуальных денниках независимо от материалов

строительных конструкций;

- в помещениях беспривязного содержания животных только в тех местах, которые находятся вблизи (до 3 м) от стационарного электрифицированного оборудования, а также зануленных металлических конструкций оборудования, трубопроводов автопоилок, ограждений и т.п., к которым возможно прикосновение животных во время кормления, поения, доения или отдыха;

- при содержании животных на открытых площадках и в манежах УВЭП следует выполнять только в случаях, когда на площадках и в манежах имеется зануленное оборудование или стационарное электрифицированное оборудование, например автопоилки с электрообогревом. При этом УВЭП должны выполняться в виде кольцевых заземлителей, закладываемых на глубину $0,44R$, где R – радиус кольцевого заземлителя, выбираемый в пределах 1,5-2,0 м.

Для защиты животных от поражения электрическим током в помещениях ферм КРС, в конюшнях и на биофабриках следует применять УВЭП, содержащие металлические стержневые или протяженные элементы, электрически соединенные с технологическим оборудованием и строительными металлоконструкциями, доступными животным, и установленные в токопроводящем полу стойл, отделенных в горизонтальном направлении от зоны нулевого потенциала участком с высоким удельным сопротивлением.

Стержни УВЭП следует погружать в землю под стойла вдоль их внешней стороны с разрежением в каждом ряду от периферии к центру. Погружают их в землю под углом 35-50° к поверхности пола стойл. Смещение внешних концов стержней от внешней стороны стойла не более 0,5 его длины. Расстояние между соседними стержнями a_i увеличивают от периферии к центру по арифметической прогрессии [3]

$$a_i = a_1 + (i-1)d, \quad (10)$$

где a_1 – удвоенная ширина стойла; i – порядковый номер расстояния между стержнями; d – разность, равная ширине стойла.

В последнем случае, т.е. при выполнении УВЭП стержнями с разрежением к центру, могут возникнуть ситуации, при которых выравнивание потенциалов может быть недостаточным для животных, находящихся ближе к середине помещения.

Рассмотрим эту ситуацию.

Сопротивление растеканию тока одиночного стержневого заземлителя R_1 с учетом его угловой установки 35-50°:

$$R_1 = \rho (\ln(4l/d) + \ln(l^2/d)) / 4\pi l, \quad (11)$$

где l – расстояние от поверхности грунта (пола) до середины стержня, м; l и d – соответственно длина и диаметр заземлителя, м; ρ – удельное электрическое сопротивление грунта, Ом.

Эквивалентное сопротивление n заземлителей (стержней) с учетом коэффициента использования η (экранирования), так как все стержни должны быть соединены между собой:

$$R_n = \frac{R_1}{\eta \cdot n} \quad (12)$$

Ток замыкания на заземляющее устройство, каким является по существу УВЭП:

$$I_3 = \frac{U_3}{R_n + R_0} \quad (13)$$

где R_0 – эквивалентное сопротивление контура заземления питающей подстанции и повторных заземлений нулевого провода на ВЛ 0,38 кВ; U_3 – напряжение замыкания на заземляющем устройстве (УВЭП) в результате аварийного режима.

Потенциал точки φ_x на расстоянии x от заземлителя:

$$\varphi_x = I_3 \cdot \rho \cdot \ln \left[\frac{\sqrt{(x^2 + l^2)} + l}{x} \right] / 2\pi \cdot l \quad (14)$$

Напряжение прикосновения:

$$U_{np} = \varphi_x \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2 \quad (15)$$

где α_1 – коэффициент напряжения прикосновения, учитывающий зависимость распределения потенциала вокруг заземлителя, т.е. форму потенциальной кривой; α_2 – коэффициент напряжения прикосновения, учитывающий падение напряжения в сопротивлении растеканию основания (подшв ног):

$$\alpha_2 = \frac{1}{(1 + R_{oc} / R_{жс})}, \quad (16)$$

где R_{oc} – сопротивление растеканию основания, на котором стоит животное, Ом; $R_{жс}$ – сопротивление тела животного, Ом.

Напряжение шага:

$$U_{ш} = \varphi_x \cdot \beta_1 \cdot \beta_2, \quad (17)$$

где β_1 – коэффициент напряжения шага, учитывающий форму потенциальной кривой; β_2 – коэффициент напряжения шага, учитывающий падение напряжения в сопротивлении основания между ногами животного.

$$\beta_2 = \frac{1}{(1 + 2R_n / R_{жс})}, \quad (18)$$

где R_n – сопротивление растеканию основания между ногами животного.

Напряжение прикосновения и напряжение шага должны быть не более 12 В (для комплексов 8 В) в аварийных режимах при замыкании на землю на ВЛ и на подстанции напряжением до 35 кВ, а при однофазном замыкании на корпус (открытые проводящие части) в сети до 1 кВ – также не более 12 В, если время возможного воздействия напряжения прикосновения свыше 10 с [3].

Приведем по вышеизложенной методике необходимые расчеты на примере четырехрядного коровника на 200 голов привязного содержания

размером 21x78 м; стойла шириной 1.2 м и длиной 1.9 м, где имеются два кормовых прохода шириной 2.25 м и три навозных прохода – два пристенных шириной 1.3 м и один в середине помещения (по длине) шириной 2.5 м.

При выполнении условия (10) в коровнике должно быть смонтировано в каждом ряду по 13 стержневых заземлителей, в целом по зданию $n=52$. Согласно [3,4] длина каждого стержня l должна быть не менее 0,5 длины стойла, т.е. в нашем случае принимаем $l=1$ м ($>1,9/2$ м). Диаметр стержней d выбирается с учетом удельного электрического сопротивления грунта ρ (коррозийной активности грунта), а для существующих животноводческих помещений - $d > 12$ мм при использовании неоцинкованной стали. Таким образом, расчеты выполняем в соответствии с [3] при $\rho=5, 10, 20, 60, 70, 100, 140$ Ом со стержнями выравнивающего устройства из неоцинкованной стали диаметром 12 ... 18 мм.

По формуле (10) получаем, что для данного коровника на 200 голов максимальное расстояние будет между пятым и шестым, восьмым и девятым стержнями каждого ряда, между которыми насчитывается по 6 стоек.

Таким образом,

$$a_{6,8} = 6 \times 1,2 = 7,2 \text{ м.}$$

Максимальное напряжение прикосновения и напряжение шага будут воздействовать на коров, стоящих посредине этих промежутков. В формуле (14) расстояние до задних ног коровы будет:

$$x = \sqrt{((7,2/2)^2 + 2^2)} = 4,1 \text{ м.}$$

Коэффициент использования стержней η в формуле (12) для $n=52$ угловой установки и $a/l=4$ согласно [6]:

$$\eta = 1/2 (h_a + h_r) = 1/2 (0,65 + 0,37) = 0,51.$$

В формуле (13) принимаем $R_0=4$ Ом, а напряжение $U_3=U_\phi=220$ В, которое может появиться на металлоконструкциях в случае неэффективного срабатывания зануления при замыкании

Показатели эффективности УВЭП

$\rho, \text{Ом} \cdot \text{м}$	$d, \text{мм}$	$R_1, \text{Ом}$	$R_n, \text{Ом}$	$I_3, \text{А}$	$\varphi_X, \text{В}$	$U_{\text{пр}}, \text{В}$	$U_M, \text{В}$
5	0,018	4,04	0,15	53,0	10,1	1,4	0,8
10	0,018	8,08	0,3	51,2	19,6	2,7	1,6
20	0,014	16,9	0,61	47,7	36,5	5,1	2,9
60	0,014	50,7	1,83	37,7	86,4	12,1	6,9
70	0,014	59,1	2,23	35,1	93,9	13,1	7,5
100	0,014	84,5	3,19	30,6	116,9	16,4	9,4
140	0,012	121,9	4,6	25,6	137,0	19,2	11,0

фазы на корпус или в нарушение требований безопасности при выполнении на металлоконструкциях коровника электросварочных работ с неисправным устройством снятия напряжения при разрыве дуги, а также в некоторых других ситуациях.

В формулах (15, 17) определить с приемлемой погрешностью коэффициенты

α_1 и β_1 расчетным путем ввиду сложности данного грунтового заземлителя (УВЭП) с неравномерным шагом весьма затруднительно. Для этой цели пользуются опытными данными.

Согласно [6, 8] принимаем $\alpha_1 = 0,14$; $\beta_1 = 0,08$. Коэффициенты

α_2 и β_2 (16, 18) будут равны 1, так как ноги животного с влажными копытами имеют непосредственный контакт с основанием (полом), на котором оно стоит (в отличие от человека в обуви). Поэтому сопротивлением $R_{\text{ос}}$ можно пренебречь.

Таким образом, получаем

$$\alpha_1 \cdot \alpha_2 = 0,14$$

$$\beta_1 \cdot \beta_2 = 0,08$$

Полученные в результате расчета данные по проверке эффективности выравнивания электрических потенциалов с помощью стержневых заземлителей на примере коровника на 200 голов привязного содержания сводим в таблицу. Как видно из таблицы, эффективность защиты животных от поражения электрическим током путем выполнения УВЭП из стержневых заземлителей с увеличением расстояния между ними от периферии к центру по арифме-

тической прогрессии не всегда может быть обеспечена и при известных параметрах УВЭП [3] зависит, в первую очередь, от удельного электрического сопротивления грунта в месте строительства. В частности, для принятых исходных данных получено, что напряжение прикосновения превышает допустимое значение (12 В) при удельном электрическом сопротивлении грунта $\rho > 60$ Ом м.

Как указывалось ранее, кроме зануления и выравнивания потенциалов, на животноводческих фермах одновременно должно выполняться уравнивание потенциалов, а также защитное отключение [1...5].

Уравнивание потенциалов – это устранение разности электрических потенциалов между всеми одновременно доступными прикосновению открытыми проводящими частями стационарного электрооборудования и сторонними проводящими частями, включая металлические части строительных конструкций зданий, достигаемое соединением этих частей друг с другом при помощи проводников. Указанные выше открытые и сторонние проводящие части должны иметь видимые электрические связи с зануленным корпусом вводного щита, с вводной трубой водопровода, с редукторами навозоуборочных и кормораздаточных транспортеров.

Защитное отключение – это автоматическое отключение участка сети, обеспечивающее безопасные сочетания тока и времени его

протекания при возникновении опасности аварийной ситуации. Основными элементами устройства защитного отключения (УЗО) являются прибор-датчик, блок управления и сигнализации, отключающий механизм. В зависимости от принятых входных величин (ток, напряжение, сопротивление) применяют УЗО различных типов.

Для рассматриваемых животноводческих помещений наиболее целесообразно использовать УЗО по току утечки (дифференциальному току), в которых датчиком служит пермаллоевый трансформатор тока тороидального типа [5,7].

Током утечки ($I_{\text{ут}}$) является ток, протекающий в сети с заземленной нейтралью по участку цепи, параллельному нулевому рабочему проводу. В случае применения пятипроводной трехфазной системы (TN-S) часть тока может также протекать и по нулевому защитному проводу (РЕ). Если на защищаемом участке сети проводимости фаз относительно земли одинаковы, то сумма мгновенных значений токов в фазных и нулевом рабочем проводе при любой произвольной несимметрии нагрузки будет равна нулю и в отключающий механизм не поступит сигнал, свидетельствующий о наличии тока утечки. При появлении тока утечки алгебраическая сумма мгновенных значений токов будет отличаться от нуля на значение тока утечки. При $I_{\text{ут}} > I_{\text{уст}}$ выдается управляющее воздействие на отключающий механизм, который

срабатывает и отключает защищаемый участок сети. На первый взгляд кажется очевидным, что, чем меньше $I_{уст}$, тем эффективнее УЗО. Однако это справедливо лишь в отношении электротранспортной функции УЗО, так как при прочих равных условиях вероятность возникновения электротравм у людей и животных уменьшается. С другой стороны, чем ниже ток уставки, тем выше вероятность ложных отключений, вызванных, например, действием различных электромагнитных помех и естественными (не аварийными) токами утечки. Налицо противоречие между электротранспортной эффективностью УЗО и эффективностью электроснабжения.

В этой связи можно рекомендовать наиболее простой способ определения тока уставки УЗО:

$$I_{уст} = U_{пр.доп} \cdot K_0' / R_{ж}'$$

где $R_{ж}'$ – электрическое сопротивление тела животного, Ом; K_0' – коэффициент в комплексной форме, определяющий соотношение между проводимостями относительно земли участков сети, находящихся по обе стороны УЗО дифференциального типа; выражение для этого коэффициента сложно, однако если проводимость участка сети в зоне защиты близка к проводимости незащищенного участка, то

$K_0' \approx 1$. Приняв электрическое сопротивление тела коровы $R_{ж}' = 400$ Ом (свиньи 1000 Ом) [8], а $U_{пр.доп} = 12$ В [3], получим: $I_{уст} = 30$ мА. Таким образом, устройства защитного отключения в животноводческих помещениях должны быть оснащены розеточные

группы, используемые для подключения переносных электроприборов, ручного электрифицированного инструмента с номинальным отключающим дифференциальным током УЗО (током уставки $I_{уст}$) не более 30 мА. Для обеспечения пожарной безопасности ферм с целью контроля состояния всей электропроводки на вводном распределительном щите целесообразно установить УЗО с током уставки 300 мА. На передвижных электроустановках рекомендуется применять устройства в качестве индивидуальной защиты с током уставки 10 мА.

Выводы

1. Для эффективной защиты от поражения электрическим током в животноводческих помещениях необходимо использовать в едином комплексе зануление электрооборудования (система TN-C-S), выравнивание и уравнивание электрических потенциалов, защитное отключение при одновременном применении оболочек электрооборудования не ниже класса IP 35.

2. Рассмотрены основные зависимости успешного срабатывания системы зануления при пробое напряжения на открытые проводящие части, которая, однако, при определенных аварийных режимах будет неэффективной.

3. Выполненные на примере коровника расчеты показывают, что выравнивание потенциалов путем использования стержневых заземлителей с определенным разрежением их установки от периферии к центру помещения (как это рекомендуется руководящими

документами) при удельном электрическом сопротивлении грунта более 60 Ом·м, может оказаться не эффективным.

4. Целесообразно использование устройств защитного отключения дифференциального типа с токами уставки для разных объектов защиты в животноводческих помещениях 10, 30, 300 мА.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 30331.3-95. Электроустановки зданий. Защита от поражения электрическим током.-15 с.
2. Правила устройства электроустановок. |Минэнерго РФ 7-е изд. Раздел 1 и 7 – М.: НЦ Энас, 2002.-171 с.
3. РД РБ 02150.007-99. Защита сельскохозяйственных животных от поражения электрическим током. Выравнивание электрических потенциалов. Общие технические требования.-27с.
4. Федорчук А.И. Устройства выравнивания электрических потенциалов на животноводческих фермах. –Мн.: БГАТУ, 2002.-25 с.
5. Федорчук А.И., Цвирко Л.Ю. Устройства защитного отключения. -Мн.: БГАТУ, 1996.- 17с.
6. Долин П.А. Основы техники безопасности в электроустановках. – М.: Энергия, 1989.-408с.
7. Федорчук А.И., Филянович Л.П., Милаш Е.А. Охрана труда при эксплуатации электроустановок |Под ред. А.И. Федорчука –Мн.: ЗАО «Техноперспектива», 2003. -259 с.
8. Луковников А.В., Шкрабак В.С. Охрана труда -М.: Агропромиздат, 1991. -320 с.

УДК 629.114.2.073

К ВОПРОСУ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТРАКТОРОВ «БЕЛАРУС» ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ РАБОТ

А.И. ЯКУБОВИЧ, д.т.н., М.А. СОЛОНСКИЙ, к. т. н. (УО БГАТУ)

Тракторы Минского тракторного завода до 1990 г. устойчиво занимали одну из ячеек типажа

тракторов, разработанного НАТИ. Заводом выпускались универсально-пропашные тракторы класса 1,4

с колесной формулой 4К2, 4К4 и 3К2. Высокие тяговые и экономические показатели в совокуп-